

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑪ DE 40 14 808 A 1

⑳ Aktenzeichen: P 40 14 808.4  
㉑ Anmeldetag: 9. 5. 90  
㉒ Offenlegungstag: 22. 11. 90

㉓ Int. Cl. 5:  
**B 23 Q 15/00**  
B 23 P 15/02  
B 23 K 9/095  
G 01 B 11/24  
G 01 M 11/08  
B 23 K 37/00  
B 23 K 37/04  
// B23K 9/04,26/00,  
H04N 1/04

DE 40 14 808 A 1

㉔ Unionspriorität: ㉕ ㉖ ㉗  
15.05.89 US 290476

㉘ Anmelder:  
General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

㉙ Vertreter:  
Schüler, H., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 6000  
Frankfurt

㉚ Erfinder:  
Rathi, Rajendra Prasad, West Chester, Ohio, US;  
Tashjian, David George, Wilmington, N.C., US;  
Burkel, Richard Hery, Maineville, Ohio, US; Gantner,  
Randall Clay, Dayton, Ohio, US; Bottoms, John  
Joseph, Arkansas City, Kan., US; Wolff, Steven  
Michael, Springboro, Ohio, US

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉛ Maschinensichtsystem

Es wird ein Visionssystem zum Automatisieren eines maschinellen Bearbeitungsverfahrens angegeben. Das System enthält eine übliche CCD-Kamera und einen Visionsprozessor, der automatisch Prozeßparameter aus einer Werkstückoberfläche ermittelt, indem ein Bild der Werkstückoberfläche generiert wird, das Werkstückbild in elektrische Signale umgewandelt wird und aus den elektrischen Signalen die Prozeßparameter elektronisch ermittelt werden. Angewendet auf ein Laserschweißverfahren lokalisiert das Visionssystem Werkstückränder, ermittelt die Teile-Mittellinie und Dicke und berechnet Prozeßparameter, wie beispielsweise Schweißlage, Geschwindigkeit der Zufuhr von Schweißpulver, Laserintensität und die Geschwindigkeit, mit der die Schweißung durchgeführt wird.

DE 40 14 808 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich allgemein auf das Gebiet numerisch gesteuerter Maschinen. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf ein Verfahren und eine Einrichtung zum Bestimmen oder Verändern von Maschinenpro-

5 zeßparametern aus einem Bild eines Werkstückes.

Obwohl die numerische Steuerung die Geschwindigkeit, Betriebssicherheit und Übereinstimmung stark verbessert hat, mit denen Werkstücke bearbeitet, geschnitten, geschweißt oder auf andere Weise bearbeitet werden können, ziehen viele Fertigungs- und Reparaturaufgaben zeitraubende Arbeiten nach sich. Beispielsweise sind Hochdruckturbinenschaufeln, wie sie in Flugzeug-Strahltriebwerken verwendet werden, empfindlich gegenüber

10 Abnutzungen an der Schaufelspitze. Gegenwärtig ist die Spitzenreparatur von im Triebwerk im Einsatz gewesenen Teilen eine zeitraubende Arbeit, bei der ein Aufbauschweißen durch einen erfahrenen Schweißer manuell auf die Schaufelspitze der Turbinenschaufel angewendet wird. Eine Automatisierung dieses Prozesses ist schwierig gewesen aufgrund der Ungleichförmigkeit der Turbinenspitzenabnutzungen und der Änderungen in den Schaufelspitzenoberflächen von Schaufel zu Schaufel, die eine Einstellung von Schweißparametern vor jeder

15 Schaufelreparatur erforderlich machen. Versuche, den Spitzenreparaturvorgang durch den Einsatz computergestützter Konstruktionstechniken (CAD) zu automatisieren, um eine Schweißbahn zu definieren, haben unverträgliche Schaufelspitzenreparaturen zur Folge gehabt aufgrund der Abweichungen in der Spitzenabnutzung und der unterschiedlichen Beanspruchungen von Schaufel zu Schaufel.

Viele automatisierte Bearbeitungssysteme verwenden Sondensysteme zum Ermitteln der Lage oder Abmessungen des Werkstückes, wobei die Sondenresultate anschließend dazu verwendet werden, Versetzungen bzw. Verschiebungen zu ermitteln, die bei den nominalen Werkstückabmessungen oder -koordinaten berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise können Koordinaten, die die Lage eines in ein Werkstück zu bohrenden Loches definieren, nach einem Prüfzyklus eingestellt werden, um die Lochlage in einem vorbestimmten Abstand von einem Rand des Teiles zu halten. Berührungsfreie, sondenlose Inspektionssysteme, die hier als Sicht- bzw.

25 Visionssysteme bezeichnet werden, sind in ähnlicher Weise verwendet worden, um die Lage oder Abmessungen eines Werkstückes zu verifizieren. Zusätzlich sind Sichtsysteme in der Vergangenheit bei relativ einfachen Gegenständen verwendet worden, um die Formen des Gegenstandes zu erkennen und zu prüfen. Einige automatisierte Bearbeitungssysteme verwenden die Ergebnisse dieses Erkennungsschrittes, um Maschinenprogramme zur Ausführung zu wählen oder vorbestimmte Prozeßparameter aus einem Speicher wiederzufinden.

Die vorliegende Erfindung ist auf ein Sicht- bzw. Visionssystem gerichtet, das sich von den vorstehend beschriebenen, bekannten Sondensystemen und Sichtsystemen dahingehend unterscheidet, daß das nachfolgend beschriebene System die Geometrie eines Werkstückes tatsächlich mißt und mathematisch beschreibt und Prozeßparameter aus einem Bild der Werkstückoberfläche generiert.

Es ist Aufgabe der Erfindung, ein neues und verbessertes Verfahren und eine Einrichtung zu schaffen zum

35 Automatisieren eines Bearbeitungsprozesses, bei dem Prozeßparameter aus einem Bild einer Werkstückoberfläche automatisch ermittelt bzw. bestimmt werden. Das Verfahren und die Einrichtung sollen zur Verwendung in einem automatisierten Bearbeitungsprozeß geeignet sein, der automatisch Prozeßparameter einstellt, um Abweichungen in den Werkstückgeometrien von Bauteil zu Bauteil zu kompensieren. Weiterhin soll dabei ein Aufbauschweißverfahren automatisiert werden, das Schweißparameter automatisch einstellt, um Abweichungen in den Werkstückgeometrien von Bauteil zu Bauteil zu kompensieren, wodurch verbesserte Ausgangsqualität des Produktes und verbesserte Gleichförmigkeit erhalten werden. Weiterhin sollen durch das Verfahren und die Einrichtung mechanisch abgenutzte Spitzen von Triebwerksschaufeln wieder hergestellt werden.

Gemäß der Erfindung wird ein Sicht- bzw. Bildsystem zum Automatisieren des Bearbeitungsprozesses geschaffen. Das System bzw. die Einrichtung ermittelt automatisch Prozeßparameter aus einer Werkstückoberfläche, indem ein Bild der Werkstückoberfläche generiert, das Werkstückbild in elektrische Signale umgewandelt

45 und die Prozeßparameter elektronisch aus den elektrischen Signalen ermittelt werden.

Bei einer Anwendung auf ein Laser-Schweißverfahren lokalisiert die Sicht- bzw. Bildeinrichtung Werkstückränder, ermittelt die Mittellinie und Dicke des Bauteils und berechnet Prozeßparameter, wie beispielsweise die Schweißstelle, die Zufuhrgeschwindigkeit von Schweißpulver, die Laser-Intensität und die Geschwindigkeit, mit der die Schweißung aufgebracht wird.

Die Erfindung wird nun mit weiteren Merkmalen und Vorteilen anhand der Beschreibung und Zeichnung von Ausführungsbeispielen näher erläutert.

Fig. 1 ist eine perspektivische Ansicht von einer typischen Flugzeug-Triebwerksschaufel mit einer Spitze der kreischenden Art, die durch ein Aufbau-Schweißverfahren repariert werden soll.

55 Fig. 2 ist eine Ansicht von oben auf die Schaufel gemäß Fig. 1.

Fig. 3 ist ein Blockdiagramm eines Laser-Systems mit einem Sicht- bzw. Visionssystem gemäß der Erfindung.

Fig. 4 ist ein Fließbild und stellt die Durchführung der Erfindung dar.

Fig. 5 ist ein Kurvenbild und zeigt die Verteilung der Bildelemente bei verschiedenen Luminanzwerten.

Fig. 6 zeigt den der Begrenzung folgenden Algorithmus, der verwendet worden ist, um die Grenzdaten zu sammeln, die dem äußeren Rand der kreischenden Spitzenwand zugeordnet sind.

60 Fig. 7 ist ein Bild von einem Teil der Schaufeln gemäß Fig. 2 nach einer Visionsverarbeitung gemäß der Erfindung.

Fig. 8 stellt ein Verfahren dar, das als Sub-Pixelation bekannt ist, zum genaueren Lokalisieren der Ränder der kreischenden Spitzenwand.

65 Fig. 1 ist eine perspektivische Darstellung von einer Rotorschaukel mit einer Spitze der kreischenden Art. Die Schaufel 10 enthält eine Vorderkante 12, eine Hinterkante 14 und, an dem radial äußeren Ende der Schaufel 10, eine kreischende Schaufelspitze 16. Die kreischende Spitzenwand 18 enthält einen äußeren Rand 20 und einen inneren Rand 22. Durch die Spitzenwand 18 ist eine Kammer 24 gebildet. Die Spitzenwand 18, der Außenrand 20,

der Innenrand 22 und die Kammer 24 sind auch in der Draufsicht in Fig. 2 gezeigt.

Die Wiederherstellung von abgenutzten Spitzenflächen auf Rotorschaukeln, wie beispielsweise der in Fig. 2 gezeigten Schaufel 10, war bisher eine zeitraubende Arbeit, bei der ein Aufbauschweißen manuell durch einen erfahrenen Schweißer auf die kreisenden Spitzenwände der Turbinenschaufel ausgeführt wird, wobei diese Arbeit typisch eine Arbeit einer Mannstunde für einen erfahrenen Schweißer pro Turbinenschaufel erfordert. Eine Automatisierung dieses Schweißverfahrens ist schwierig gewesen wegen der Ungleichförmigkeit der Turbinenspitzenabnutzung und der Abweichungen in kreisenden Spitzenwandflächen von Schaufel zu Schaufel. Diese Abweichungen von Schaufel zu Schaufel erfordern Änderungen in den Schweißprozeßparametern vor jeder Schaufelreparatur.

Fig. 3 ist ein Blockdiagramm eines automatisierten Laser-Systems zum Durchführen einer Aufbauschweißung an kreisenden Spitzenwänden von Flugzeug-Triebwerkschaufeln. Die Laser-Schweißeinrichtung enthält ein Bild- bzw. Visionssystem gemäß der Erfindung. Die Spitzenoberfläche einer Schaufel 30, die durch das Laser-System bearbeitet werden soll, wird gereinigt und geschliffen. Eine Schaufel 30 wird dann in einer Halterung 32 befestigt. Ein Materialhandhabungscomputer 34 steuert ein Transport- und Schubstangensystem (nicht gezeigt), das die Montagehalterung 32 und die daran befestigte Schaufel einem Tisch 36 mit numerisch gesteuerten Achsen zuführt. Dieser Tisch 36 nimmt die Halterung 32 von dem Schubstangensystem auf und bewegt die Schaufel 30 in das Sicht- bzw. Betrachtungsbild einer Festkörper-CCD Kamera 38, wie beispielsweise einem Modell 240-T der Firma Pulnix Amerika, für eine Inspektion durch das Visionssystem.

Das Visionssystem enthält eine Kamera 38, einen Visionsprozessor 40, einen Video-Monitor 42 und eine Operator-Konsole 44. Der Abtastmechanismus innerhalb der Kamera 38 generiert ein Videosignal aus einem Bild der Schaufel und liefert dieses Signal an den Visionsprozessor 40. Der Visionsprozessor, der ein DX/VR Visionscomputer der Firma International Robomation/Intelligence sein kann, ermittelt Schweiß- und Laser-Parameter, wie beispielsweise die Schweißlage, Geschwindigkeit der Zufuhr von Schweißpulver, Laser-Leistungsintensität und die Geschwindigkeit, mit der die Schweißung durchgeführt wird. Der Visionsprozessor steht über ein Interface mit dem Materialhandhabungscomputer 34, einem numerischen Steuerungsgerät 56 und einer Laser-Steuerung 48 in Verbindung, um den Laser-Betrieb, die Strahlbündelzufuhr, die Schweißpulverzufuhr und die Positionierung des Werkstückes unter dem Laser 50 zu steuern.

Der Monitor 32 gestattet eine Beobachtung des Schweißprozesses durch einen menschlichen Operator. Durch die Konsole 34 kann der Operator mit dem Visionsprozessor kommunizieren und die Programmierung des Visionssystems steuern oder ändern.

Das von der Einrichtung gemäß Fig. 3 verwendete Verfahren zum automatischen Ermitteln von Schweißparametern ist in dem Fließbild gemäß Fig. 4 dargestellt. Bevor eine Bildinformation erhalten und verarbeitet werden kann, muß die Schaufel in einer bekannten Position innerhalb des Sichtfeldes der Kamera 38 angeordnet sein. Das Visionssystem kommuniziert mit der Achsen-Steuerung 46, um die Schaufel 30 und die Scheibe bzw. Platte 32, an der die Schaufel befestigt worden ist, an der richtigen Stelle unter der Kamera 38 zu positionieren.

Die Kamera 38 wird dann fokussiert, so daß ein Bild der oberen Fläche der kreisenden Spitzenwand der Schaufel 30 auf der lichtempfindlichen Array innerhalb der Kamera abgebildet und durch den Abtastmechanismus innerhalb der Kamera in ein Videosignal umgewandelt wird. Eine CCD-Kamera des Typs T-240 der Firma Pulnix Amerika enthält eine Matrix von  $256 \times 256$  lichtempfindlichen Elementen und löst somit das empfangene Bild in 65 536 Bildelemente oder Pixels auf. Das Videosignal wird dem Videoprozessor 40 zugeführt, der das Videosignal in digitale Pixeldaten umwandelt, wobei ein Luminanzwert zwischen null für schwarz und 255 für weiß jedem Bildelement der Matrix zugeordnet wird.

Um zwischen der Teileoberfläche (Oberseite der kreisenden Spitzenwand) und dem Hintergrund zu unterscheiden, wird die digitale Pixelinformation als nächstes in binäre Form oder in Werte von entweder null (schwarz) oder 255 (weiß) umgewandelt. Dieser Prozeß wird besser verständlich aus dem in Fig. 5 gezeigten Kurvenbild.

Die Luminanzwerte im Bereich von 0 bis 255 werden entlang der X-Achse der Kurve aufgetragen. Vertikal ist entlang der Y-Achse die Gesamtzahl an Pixeln aufgetragen, die während einer Halbbild- bzw. Rahmen-Abtastung gefunden werden, um den angezeigten Luminanzwert zu haben. Beispielsweise gibt der Punkt 80 an, daß etwa 450 Pixel einen Luminanzwert von 45 haben. Wie in Fig. 5 gezeigt ist, enthält die Kurve zwei Spitzen an Punkten 80 und 82 und ein Tal mit einem Tiefstwert am Punkt 84. Es wird relativ wenig Licht von der Hintergrundfläche reflektiert, die die kreisende Spitzenwand umgibt, und demzufolge hat die Mehrzahl an Pixeln einen kleinen Luminanzwert, wobei eine maximale Anzahl von Pixeln einen Luminanzwert von 45 (Punkt 80) hat. Die obere Fläche der Spitzenwand, die gereinigt und geschliffen und in der Brennebene der Kamera angeordnet worden ist, reflektiert eine größere Lichtmenge als die Hintergrundfläche. Diese Pixel bilden denjenigen Abschnitt der Kurve mit den Luminanzwerten um 195 herum und mit dem Spitzenwert am Punkt 82.

Das Visionssystem ist programmiert, um das Tal zu suchen, das zwischen den Spitzenwerten 80 und 82 angeordnet ist. Der Luminanzwert, der dem Tiefpunkt des Tals zugeordnet ist, dem Punkt 84 mit einem Luminanzwert von 150, wird dazu verwendet, die digitalen Pixelwerte zu binarisieren. Alle Pixel mit Luminanzwerten kleiner als 150 werden einem Wert null (schwarz) zugeordnet, und alle Pixel mit einem Luminanzwert größer als 150 werden einem Wert 255 (weiß) zugeordnet. Alle Pixelkoordinaten und zugeordneten binären Werte werden in einem Speicher innerhalb des Visionsprozessors gespeichert.

Es sei darauf hingewiesen, daß die Kurve gemäß Fig. 5 nur ein Beispiel ist. Die Form der Kurve, die Verteilung der Pixel entlang der Luminanz-Skala und der Luminanz-Schwellenwert von 150 sind lediglich zu Beschreibungszwecken angegeben. Tatsächliche Pixelzählwerte und auch die Lagen der Spitzenwerte und des Tales werden sich von Fig. 5 unterscheiden.

Das Visionssystem sammelt als nächstes die Pixeldaten, die die äußere Umgrenzung der oberen Oberfläche der Spitzenwand definieren. Der der Grenzlinie folgende Algorithmus, um die Grenzdaten zu sammeln, wird

einfacher in Verbindung mit Fig. 6 erläutert. Die Form, die mit der Bezugszahl 90 bezeichnet ist, stellt das Bild der Spitze einer Turbinenschaufel dar. Jedes "+" und jedes "W" gibt die Lage eines Bildelements oder Pixels an. Diejenigen Pixel, die mit einem "W" bezeichnet sind, sind der Schaufelspitzenoberfläche zugeordnet und haben Binärwerte von 255 oder weiß. Die Pixel, die durch ein "+" bezeichnet sind, sind dem Hintergrund des Gegenstandes zugeordnet und haben Binärwerte von null oder schwarz. Die X- und Y-Koordinaten von jedem Pixel können durch Bezugnahme auf die Koordinatenwerte ermittelt werden, die entlang der unteren bzw. linken Seite der Figur gezeigt sind. Beispielsweise hat Pixel 92 eine X-Koordinate von 2 und eine Y-Koordinate von 1. Die Form der Schaufelspitze 90 und die Lage der in Fig. 6 gezeigten Pixel sind stark vergrößert, um die Erläuterung der Funktion des der Grenzlinie folgenden Algorithmus zu unterstützen.

Der der Grenzlinie folgende Algorithmus tastet die Pixeldaten, die in dem Speicher in dem Visionsprozessor gespeichert sind, ab, wobei er die Daten von links nach rechts in Fig. 6 abtastet, wie es durch Pfeile 92 gezeigt ist, bis ein Pixel mit einem Luminanzwert von 255 lokalisiert wird. Als Beispiel ist das Pixel 94 mit den Koordinaten  $X=2$  und  $Y=5$  als der erste Grenzpunkt gezeigt, der durch den der Grenzlinie folgenden Algorithmus lokalisiert wird. Die Koordinaten dieses ersten Pixels werden gespeichert. Der Algorithmus untersucht dann die Pixel neben diesem ersten Pixel, um einen zweiten Grenzpunkt zu lokalisieren, wobei in Gegenuhreigerrichtung um das erste Pixel gesucht wird. Diese Such-Routine ist in der oberen rechten Ecke von Fig. 6 gezeigt. Nachdem ein Pixel "a" als ein Grenzpunkt identifiziert worden ist, untersucht die Such-Routine die benachbarten Pixel in der Reihenfolge  $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow i$ , um den nächsten Grenzpunkt zu identifizieren. Die Koordinaten des neu aufgefundenen Grenzpunktes werden anschließend gespeichert, und eine Suche in Gegenuhreigerrichtung um diesen Punkt wird durchgeführt. Die Suche wird fortgesetzt, bis der erste Punkt wiedergefunden wird, wodurch eine Schleife geschlossen wird.

Um anschließende Berechnungen zu vereinfachen und die Bearbeitungszeit zu verkürzen, werden die Grenzdaten erneut abgetastet (resampelt), um die Anzahl von Grenzpunkten, die mehrere 100 betragen können, auf eine kleinere, besser handhabbare Zahl zu verkleinern. Dieses Resampling wählt Punkte aus, die in gleichen Abständen entlang der Grenzlinie angeordnet sind. In dem hier beschriebenen System beträgt die vorgeschlagene Anzahl neu abgetasteter Punkte 64.

Aus den 64 erneut abgetasteten bzw. resampelten Punkten können Gleichungen, die die Grenzlinie definieren, unter Verwendung von Fourier-Analyse-Techniken ermittelt werden. Es ist zwar möglich, Algorithmen zu entwickeln, die mit jeder Anzahl von Punkten arbeiten, aber eine maximale Effizienz der Berechnung wird erhalten, wenn die Anzahl von Grenzpunkten auf eine ganzzahlige Potenz von zwei begrenzt wird, also beispielsweise auf 32, 64 oder 128. Diese Effizienz resultiert aus dem Binärsystem, auf dem die Computerarchitektur aufgebaut ist.

Die Teilegrenze bildet eine geschlossene Kurve, die als eine Funktion des Abstandes "t" von einem Anfangspunkt auf der Grenzlinie ausgedrückt werden kann, wobei man der Kurve entgegen Uhrzeigerrichtung folgt. Da die Grenzlinie eine geschlossene Schleife bildet, ist die Funktion periodisch und kann in Fourier-Reihen ausgedehnt werden:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j2\pi n t / T} \quad (\text{Gleichung 1})$$

wobei

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-j2\pi n t / T} dt \quad (\text{Gleichung 2})$$

verschiedene Terme in den obigen Gleichungen sind wie folgt definiert.

$C_n$  = komplexer Fourier-Koeffizient

$j = \sqrt{-1}$

$T$  = gesamte Strecke um die geschlossene Kurve

$n$  = Anzahl der Koeffizienten.

Der zu der Kurve passende Algorithmus, der in dem Visionssystem verwendet ist, benutzt Fourier-Analyse-Techniken, um eine komplexe Zahl zu generieren, die wie folgt in Vektorform ausgedrückt werden kann:

$$f(t) = x(t) + jy(t) \quad (\text{Gleichung 3})$$

Diese Gleichung wird anschließend verwendet, um Gleichungen für mehrere Linien senkrecht zu der Grenzlinie zu berechnen.

Eine Linie senkrecht zu Gleichung 3 an einem Punkt  $t=t_1$  kann aus der Gleichung  $y-y_1 = (-1/m)(x-x_1)$  ermittelt werden, wobei  $m$  die x-y-Steigung von  $f(t)$  am Punkt  $t=t_1$  ist. Die Steigung  $m$  kann ermittelt werden, indem die Partialableitung von  $y(t)$   $\partial y / \partial t$ , am Punkt  $t=t_1$  durch die Partialableitung von  $x(t)$ ,  $\partial x / \partial t$ , am Punkt  $t=t_1$  dividiert wird. Eine Linie normal zur Gleichung 3 wird an jedem der 64 Resampelpunkte generiert.

Es wird nun auf Fig. 7 eingegangen, die ein Bild von einem Teil der Schaufel gemäß Fig. 2 nach einer Visionsverarbeitung gemäß der Erfindung ist für eine Erläuterung, wie die Schweißbahn und die Teiledicke

ermittelt werden. Die binärisierten Luminanzwerte für die Pixel, die entlang jeder Normalen angeordnet sind, werden untersucht, um den Außenrand 102 und den Innenrand 104 der Spitzenwand zu lokalisieren, wobei ein Randpunkt immer dort identifiziert wird, wo benachbarte Pixel entlang einer normalen Linie signifikant unterschiedliche Luminanzwerte haben. Beispielsweise enthält die Normallinie 100 einen äußeren Randpunkt 106 und einen inneren Randpunkt 107. Es werden die zwei folgenden Gleichungen verwendet, um einen Schweißpunkt entlang einer der 64 Normallinien zu ermitteln.

$$x = x_1 + p(x_2 - x_1) + b_x \quad (\text{Gleichung 4})$$

$$y = y_1 + p(y_2 - y_1) + b_y \quad (\text{Gleichung 5})$$

In den obigen Gleichungen sind  $x_1$  und  $y_1$  die Koordinaten des äußeren Randpunktes entlang einer Normallinie;  $x_2$  und  $y_2$  sind die Koordinaten des inneren Randpunktes entlang der gleichen Normallinie; und  $p$  und  $b$  sind Variable, die durch den Benutzer gesetzt sind. Der Wert der Variablen  $p$  kann in dem Bereich von 0 bis 1 liegen und stellt das Verhältnis des Abstandes zwischen dem Schweißpunkt und dem äußeren Randpunkt zu dem Gesamtabstand zwischen den äußeren und inneren Randpunkten dar. Beispielsweise gibt ein Wert von 0,5 für  $p$  an, daß der Schweißpunkt an dem Mittelpunkt des Liniensegmentes zwischen den Punkten  $(x_1, y_1)$  und  $(x_2, y_2)$  liegen soll. Die Variable  $b$  ist eine Strecke, die dazu verwendet ist, die Lage des Schweißpunktes direkt vorzuspannen.  $b_x$  und  $b_y$  sind die  $x$ - bzw.  $y$ -Komponenten der Variablen  $b$ .

Die Koordinaten der 64 Schweißpunkte werden durch Verwendung der obigen Gleichungen ermittelt. Diese 64 Punkte definieren die Schweißbahn. In dem speziellen Fall, wo  $p$  mit 0,5 und  $b$  mit 0 gewählt ist, ist die Schweißbahn die Mittellinie oder die mittlere Linie der Spitzenwand. Die Schweißbahn kann näher an dem äußeren (oder inneren) Rand der Spitzenwand positioniert werden, indem die Parameter  $p$  und  $b$  verändert werden. Die Teiledicke entlang irgendeiner normalen Linie kann auf einfache Weise ermittelt werden, indem der Abstand zwischen den zwei Randpunkten berechnet wird, die entlang der Normalen identifiziert sind.

Die Lage der inneren und äußeren Randpunkte entlang jeder Normallinie kann präzise ermittelt werden durch einen Prozeß, der Sub-Pixelation genannt wird. Unter Verwendung dieses Prozesses kann die präzise Lage eines Randpunktes dadurch ermittelt werden, daß der Luminanzwert von jedem Pixel entlang einer Normallinie, in der Nähe des Teilrandes, über der Pixelposition entlang der Normallinie aufgetragen wird. Fig. 8 ist eine Darstellung dieser Relation zwischen dem Luminanzwert und der Pixellage.

In Fig. 8 ist  $g(x)$  die Funktion, die die Beziehung zwischen dem Luminanzwert und der Pixelposition definiert, wobei die Variable  $x$  die Pixelposition darstellt. Der minimale Luminanzwert, der dem Hintergrund des Objektes zugeordnet ist, ist mit "H" bezeichnet. Der maximale Luminanzwert, der der oberen Oberfläche der Schaufel zugeordnet ist, ist mit "H + K" bezeichnet. Der Abschnitt von  $g(x)$  zwischen  $x = x_1$  und  $x = x_2$ , wobei  $g(x)$  von H bis H + K im Wert anwächst, entspricht der Teilegrenze. Die präzise Lage des Teilerandes, in Fig. 8 mit "L" bezeichnet, kann dadurch ermittelt werden, daß die Momente nullten Grades ( $M_0$ ), ersten Grades ( $M_1$ ) und zweiten Grades ( $M_2$ ) der Funktion  $g(x)$  berechnet werden.

$$M_0 = - \int_{x_1}^{x_2} g(x) dx = 2H + K - Lk \quad (\text{Gleichung 6})$$

$$M_1 = - \int_{x_1}^{x_2} xg(x) dx = K(1 - L^2)/2 \quad (\text{Gleichung 7})$$

$$M_2 = - \int_{x_1}^{x_2} x^2 g(x) dx = [2H + K(1 - L^3)]/3 \quad (\text{Gleichung 8})$$

Die präzise Randlage des Objektes wird anschließend berechnet, indem die vorstehenden Momentgleichungen für  $L$  gelöst werden.

$$L = (3M_2 - M_0)/2M_1 \quad (\text{Gleichung 9})$$

Der Visionsprozessor verwendet auch die Schweißbahndaten, Dickendaten, Grenzdaten und andere Koordinatendaten, um zusätzliche Schweiß- und Laser-Parameter zu ermitteln, wie beispielsweise die Geschwindigkeit der Zufuhr von Schweißpulver, der Laserintensität und der Geschwindigkeit, mit der die Schweißung durchgeführt wird.

Nachdem alle Prozeßparameter berechnet worden sind, wird die Koordinaten- und Prozeßparameterinformation an die numerische Steuerung und an die Laser-Steuerung geliefert, das Werkstück wird unter dem Schweiß-Laser positioniert und die Aufbauschweißung wird auf die Spitzenwand ausgeübt.

Aus der vorstehenden Beschreibung wird für den Fachmann deutlich, daß die Erfindung nicht auf das spezielle Ausführungsbeispiel, wie es beschrieben und dargestellt ist, beschränkt ist, und daß zahlreiche Modifikationen und Abänderungen im Rahmen der gegebenen Lehre möglich sind. Beispielsweise stehen viele an die Kurve angepaßte Algorithmen zur Verfügung oder können entwickelt werden, um eine Gleichung aus einer Vielzahl

bekannter Punkte auf einer Kurve zu generieren. Auch kann das erforderliche Werkstückbild in dem sichtbaren, ultravioletten oder infraroten Bereich liegen oder kann durch Ultraschall- oder Röntgeninspektion ermittelt werden.

Es können auch Kameras mit höherer Auflösung und entsprechende Visionsprozessoren verwendet werden, um genauere Werkstückinformationen zu erhalten. Eine bessere Genauigkeit und höhere Auflösung können auch dadurch erhalten werden, daß das Werkstück in Sektionen verarbeitet wird, wobei eine Gesamtinspektion des Werkstückes dadurch erhalten wird, daß der Prozeß an mehreren verschiedenen Stellen des Werkstückes unter der Kamera wiederholt wird. Die somit erhaltenen Daten können anschließend verknüpft werden, um eine vollständige Inspektion des Gesamtwerkstückes zu erhalten.

Da das vorstehend beschriebene Visionssystem von dem auszuführenden Bearbeitungsprozeß unabhängig ist, ist es nicht auf die Automatisierung eines Laser-Schweißvorganges beschränkt und kann adaptiert werden, um mit anderen Bearbeitungsprozessen zusammenzuarbeiten, wie beispielsweise schleifen, schneiden, entgraten, stanzen, bohren, pressen, inspizieren und messen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln von Prozeßparametern von einer Werkstückoberfläche in einer automatisierten maschinellen Bearbeitungseinrichtung, gekennzeichnet durch:

Generieren eines Bildes der Oberfläche,

Umwandeln des Bildes in elektrische Signale,

elektronisches Ermitteln der Werkstückgeometrie aus den elektrischen Signalen und elektronisches Ermitteln der Prozeßparameter aus der Werkstückgeometrie.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß

das Generieren eines Bildes das Fokussieren elektromagnetischer Energie enthält, die von der Oberfläche durch einen Sensor empfangen wird, und das Umwandeln des Bildes in elektrische Signale enthält, daß das Bild in mehrere Bildelemente zerlegt wird und die Bildelemente abgetastet werden, um eine Reihe elektrischer Impulse zu generieren, wobei die Amplitude von jedem Impuls proportional zur Intensität der elektromagnetischen Energie ist, die einem entsprechenden Bildelement zugeordnet ist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß

die elektromagnetische Energie Licht aufweist, das von der Werkstückoberfläche reflektiert wird, der Sensor die lichtempfindliche Array innerhalb einer Fernsehkamera aufweist und die Umwandlung des Bildes in elektrische Signale durch die Kamera ausgeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Ermittlung der Werkstückgeometrie enthält, daß die Koordinaten der Bildelemente, die einem speziellen Merkmal der Oberfläche zugeordnet sind, identifiziert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Merkmal ein Werkstückrand ist.

6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet,

daß das elektronische Ermitteln der Werkstückgeometrie enthält, daß eine mathematische Gleichung aus den Bildelementkoordinaten generiert wird.

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberfläche eine Schaufelspitze einer Turbinenschaufel aufweist.

8. Verfahren zum Ermitteln von Schweißparametern von einer Werkstückoberfläche in einer automatisierten Schweißeinrichtung, gekennzeichnet durch:

Generieren eines Bildes der Oberfläche,

Umwandeln des Bildes in elektrische Signale,

elektronisches Ermitteln der Werkstückgeometrie aus den elektrischen Signalen und elektronisches Ermitteln der Schweißparameter aus der Werkstückgeometrie.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das elektronische Ermitteln der Schweißparameter enthält, daß die Menge an Schweißmaterial, die auf die Werkstückoberfläche aufzubringen ist, elektronisch ermittelt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das elektronische Ermitteln der Schweißparameter enthält, daß die Wärmemenge, die während des Schweißprozesses aufgebracht wird, elektronisch ermittelt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet,

daß das elektronische Ermitteln der Schweißparameter enthält, daß die Stellen auf der Werkstückoberfläche, wo während des Schweißprozesses Wärme aufgebracht werden soll, elektronisch ermittelt werden.

12. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet,

daß das Generieren eines Bildes enthält, daß elektromagnetische Energie, die von der Oberfläche in einem Sensor empfangen wird, fokussiert wird und die Umwandlung des Bildes in elektrische Signale enthält, daß das Bild in mehrere Bildelemente geteilt wird und die Bildelemente abgetastet werden, um eine Reihe elektrischer Impulse zu generieren, wobei die Amplitude von jedem Impuls proportional zur Intensität elektromagnetischer Energie ist, die einem entsprechenden Bildelement zugeordnet ist.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die elektromagnetische Energie Licht aufweist, das von der Werkstückoberfläche reflektiert wird, der Sensor die lichtempfindliche Array innerhalb einer Fernsehkamera aufweist und die Umwandlung des Bildes in elektrische Signale durch die Kamera ausgeführt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Ermitteln der Werkstückgeometrie

enthält, daß die Koordinaten der Bildelemente, die einem speziellen Merkmal der Oberfläche zugeordnet sind, identifiziert werden.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß das Merkmal ein Werkstückrand ist.

16. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß das elektronische Ermitteln der Werkstückgeometrie enthält, daß eine mathematische Gleichung aus den Bildelementkoordinaten generiert wird. 5

17. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberfläche die Schaufelspitze einer Turbinenschaufel aufweist.

18. Verfahren zum Ermitteln von Prozeßparametern in einer automatisierten Einrichtung zur Ausführung einer Aufbauschweißung bei den kreischenden Spitzenwänden einer Turbinenschaufel, wobei die kreischenden Spitzenwände innere und äußere Ränder aufweisen, gekennzeichnet durch: 10

Generieren eines Bildes der Schaufelspitzenoberfläche der Turbinenschaufel,

Umwandeln des Bildes in elektrische Signale,

elektronisches Ermitteln der Geometrie der Schaufelspitze aus den elektrischen Signalen und elektronisches Ermitteln der Prozeßparameter aus der Schaufelspitzengeometrie.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß 15

die elektromagnetische Energie Licht aufweist, das von der Werkstückoberfläche reflektiert wird,

der Sensor die lichtempfindliche Array innerhalb einer Fernsehkamera aufweist, und

die Umwandlung des Bildes in elektrische Signale durch die Kamera ausgeführt wird.

20. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß, die Ermittlung der Schaufelspitzengeometrie enthält, daß die Breite der Spitzenwände gemessen wird, und die Ermittlung der Prozeßparameter 20

enthält, daß die Menge des Schweißmaterials, das auf die obere Oberfläche der Spitzenwände aufgebracht werden soll, elektronisch ermittelt wird.

21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet,

daß die Ermittlung der Prozeßparameter ferner enthält,

daß die Wärmemenge, die während des Schweißprozesses aufgebracht werden soll, elektronisch ermittelt 25

wird.

22. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Ermittlung der Prozeßparameter enthält, daß die Bahn, entlang Wärme während des Schweißprozesses aufgebracht werden soll, elektronisch ermit- 30

telt wird.

23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Bahn die Mittellinie der Wand aufweist.

24. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet,

daß die Generierung eines Bildes enthält, daß elektromagnetische Energie, die von der Oberfläche auf einem Sensor empfangen wird, fokussiert wird, und die Umwandlung des Bildes in elektrische Signale 35

enthält, daß das Bild in mehrere Bildelemente geteilt wird und die Bildelemente abgetastet werden, um eine Reihe von elektrischen Impulsen zu generieren, deren Amplitude jeweils proportional zur Intensität elektromagnetischer Energie ist, die einem entsprechenden Bildelement zugeordnet ist.

25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet daß

die elektromagnetische Energie Licht aufweist, das von der Werkstückoberfläche reflektiert wird, der 40

Sensor die lichtempfindliche Array innerhalb einer Fernsehkamera aufweist und

die Umwandlung des Bildes in elektrische Signale durch die Kamera ausgeführt wird.

26. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Ermittlung der Schaufelspitzengeometrie 45

enthält: Identifizieren der Koordinaten eines Satzes von Bildelementen, die dem äußeren Rand der Spitzenwand zugeordnet sind,

Generieren einer ersten mathematischen Gleichung aus den Koordinaten, wobei die Gleichung die durch den äußeren Rand gebildete Kurve definiert,

elektronisches Ermitteln der Steigung der Kurven an gewählten Koordinaten,

Generieren eines Satzes mathematischer Gleichungen, wobei jede der letztgenannten Gleichungen eine Linie senkrecht zu der durch den äußeren Rand gebildeten Kurven definiert und die Kurve an einer der 50

gewählten Koordinaten schneidet, und

Messen der Breite der Spitzenwände durch Messen der Länge von jeder der Linien zwischen dem äußeren 55

Rand und dem inneren Rand.

27. Verfahren nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß die Ermittlung der Prozeßparameter enthält: elektronisches Ermitteln der Menge an Schweißmaterial, das auf die obere Oberfläche der Spitzenwände 60

aufgebracht werden soll, elektronisches Ermitteln der Wärmemenge, die während des Schweißprozesses aufgebracht werden soll,

elektronisches Ermitteln des Mittelpunktes von jeder der Normallinien und

elektronisches Ermitteln der Bahn entlang der Wärme des Schweißprozesses aufgebracht wird, wobei die Bahn die Mittelpunkte von jeder der Normallinien schneidet. 65

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

— Leerseite —

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



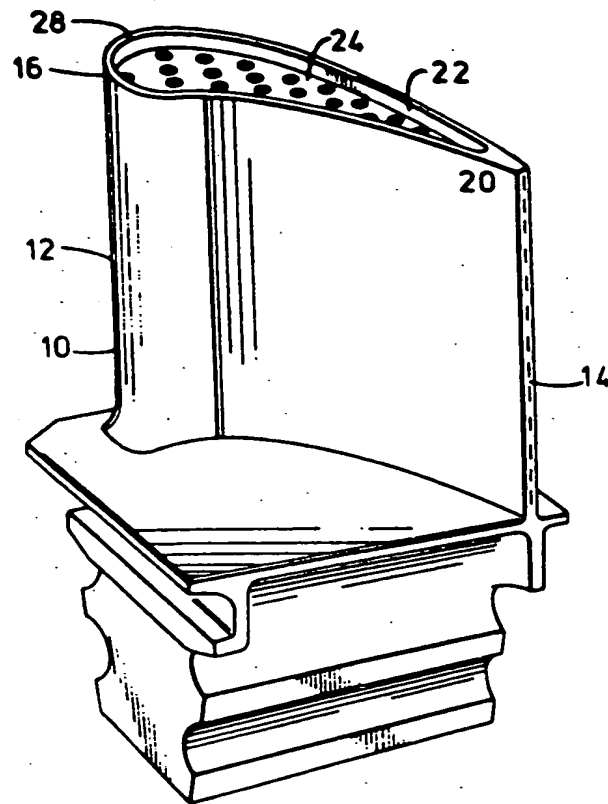


FIG. 1

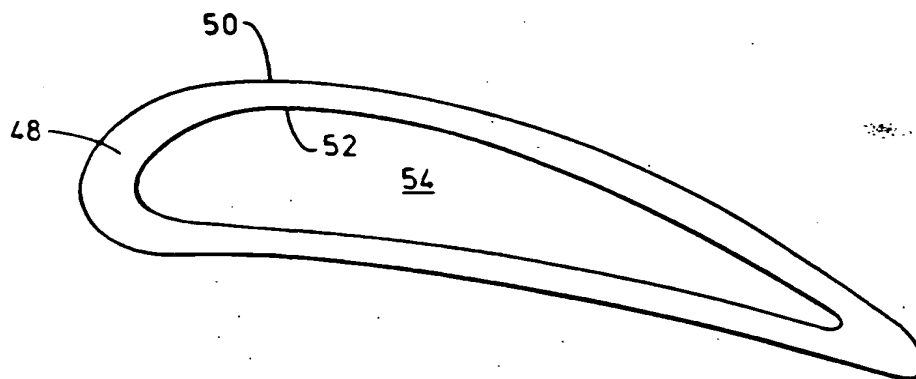


FIG. 2

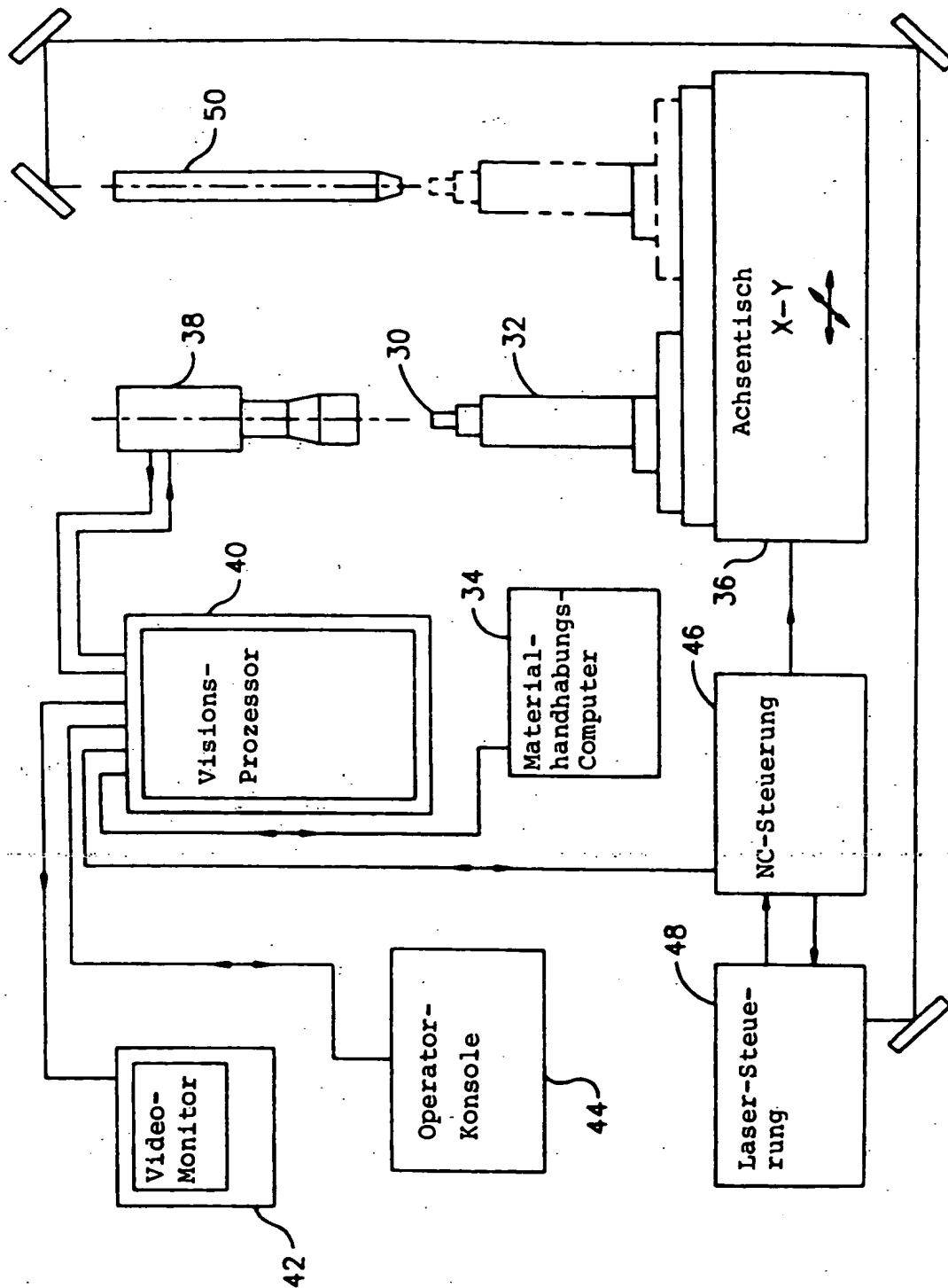


FIG. 3

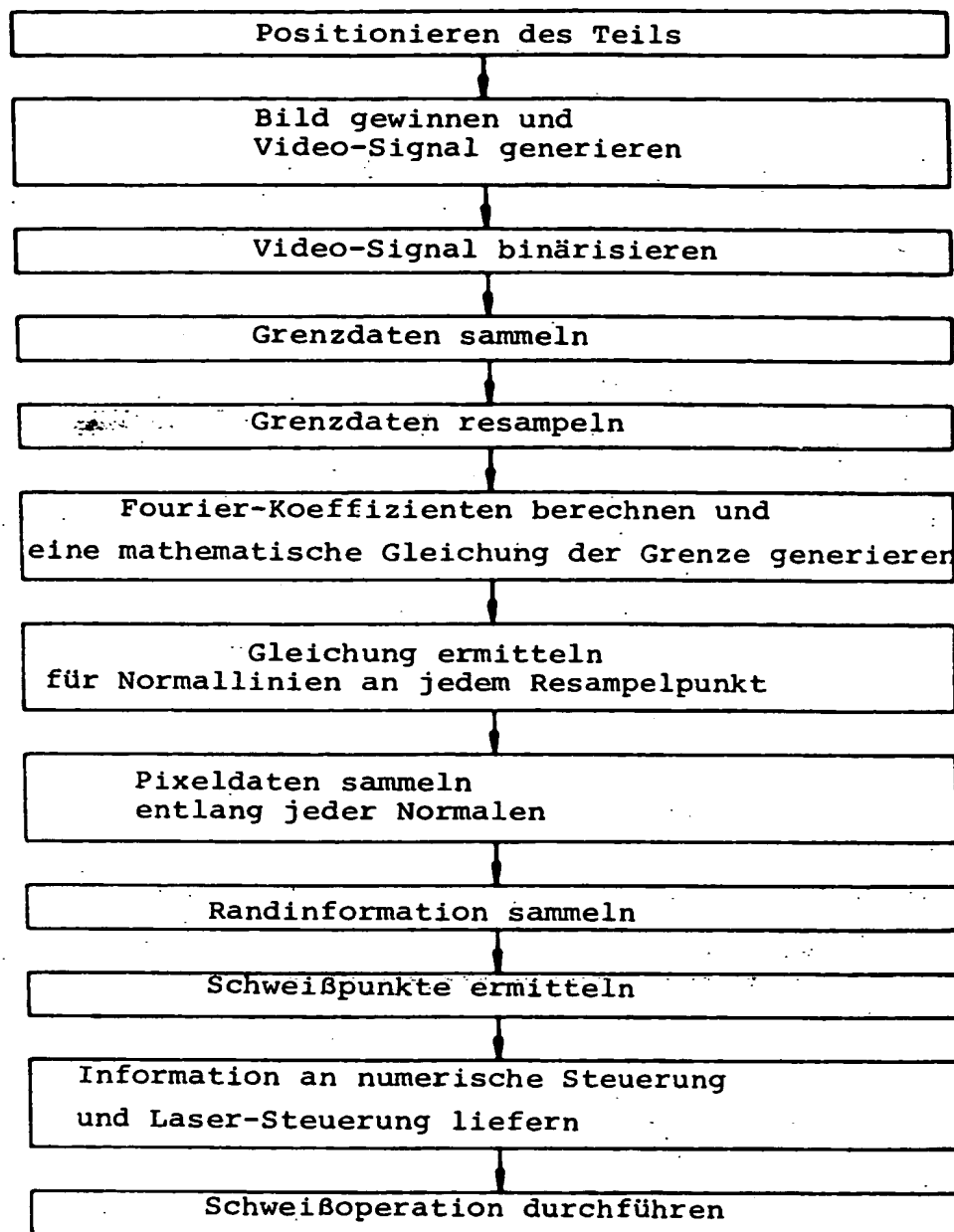


FIG. 4

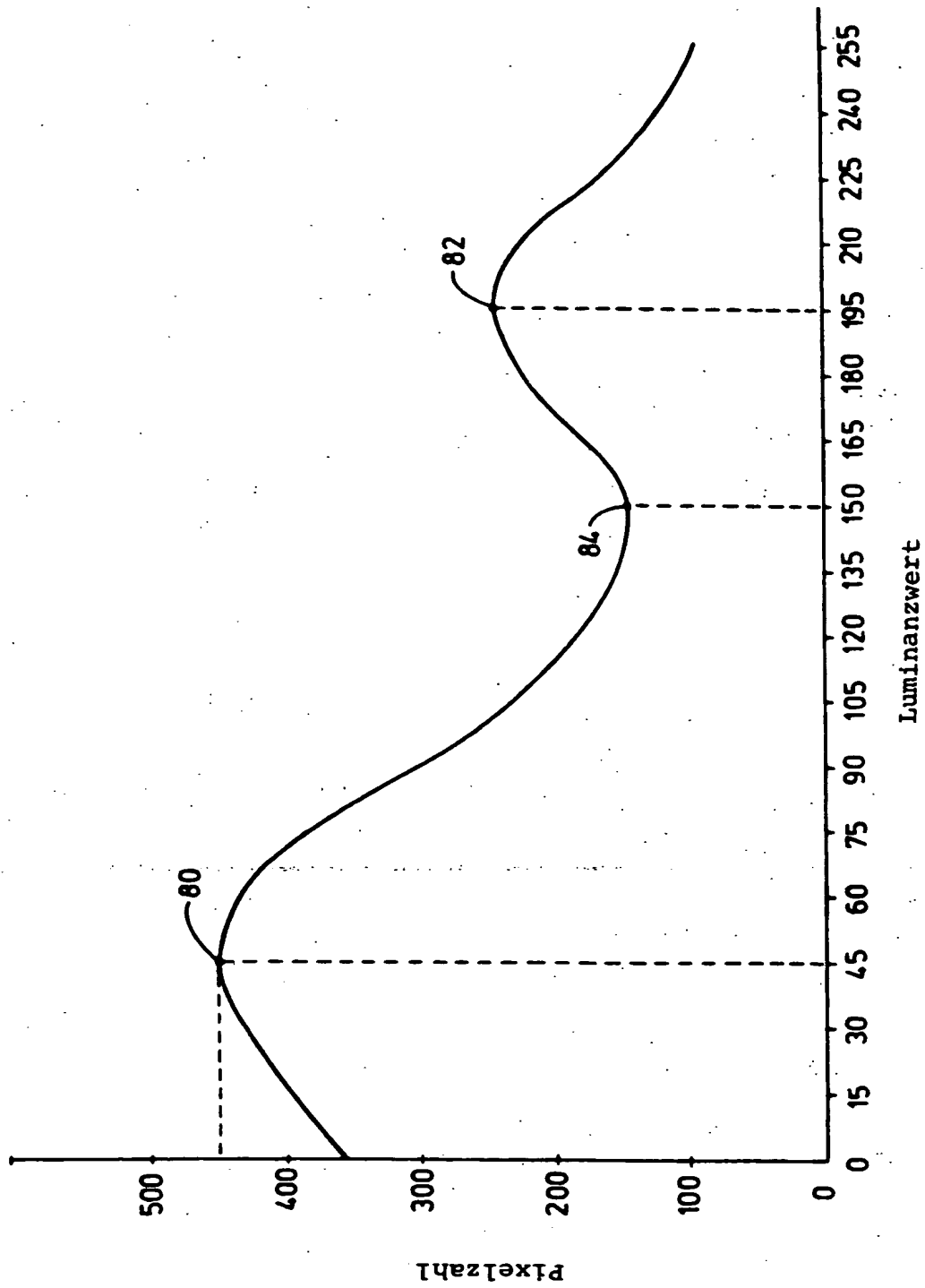


FIG. 5

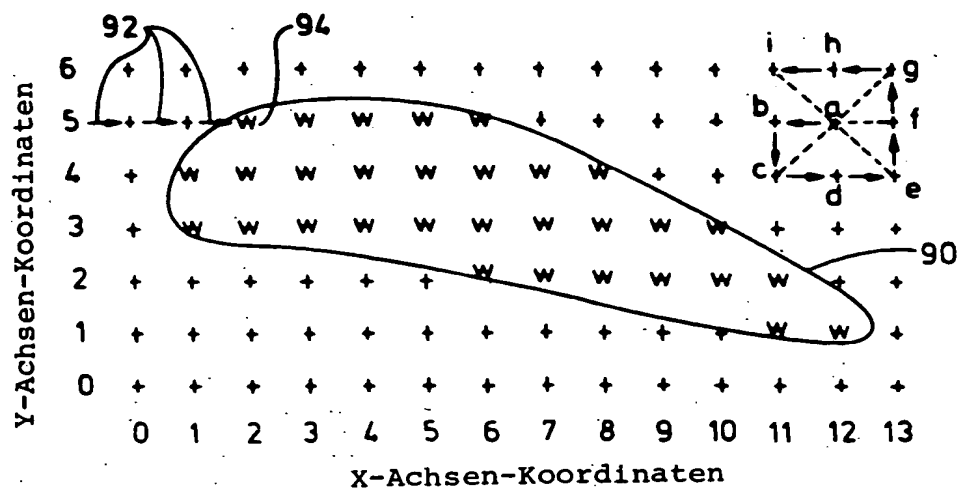


FIG. 6

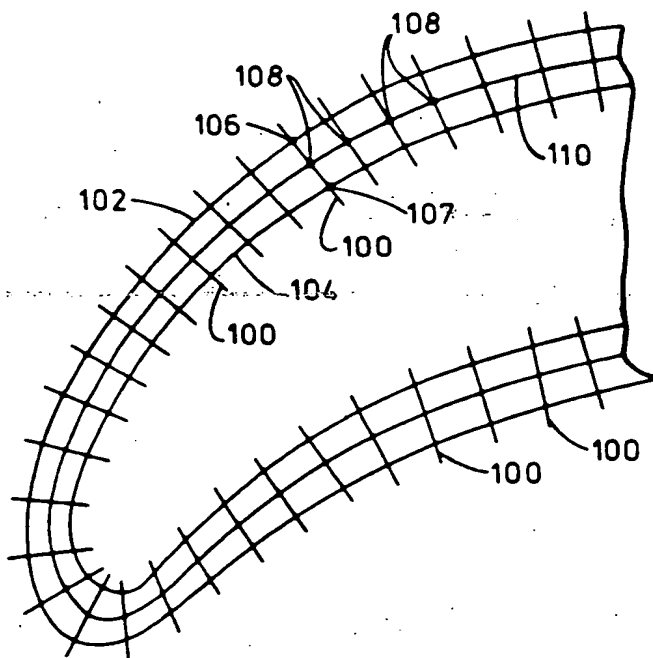


FIG. 7

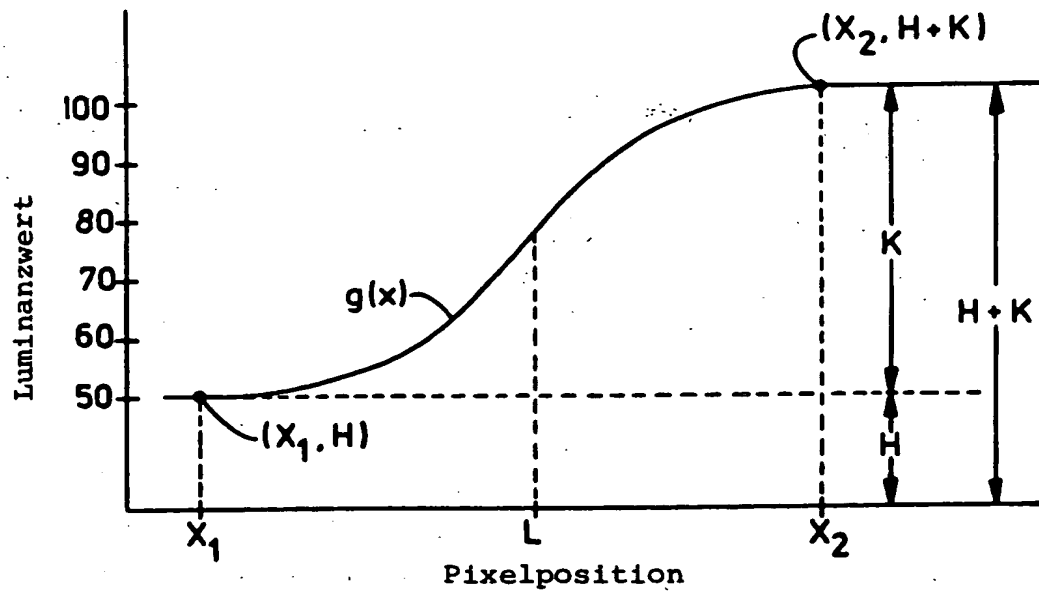


FIG. 8